

## 少模光纤布拉格光栅折射率传感的分析与测量

徐俊娇<sup>1</sup> 李 杰<sup>1</sup> 戎华北<sup>1</sup> 石志东<sup>2</sup> 董小鹏<sup>1,2</sup> $\left[ \begin{array}{l} ^1 \text{ 厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005} \\ ^2 \text{ 上海大学上海市特种光纤重点实验室, 上海 201800} \end{array} \right]$ 

**摘要** 理论分析和模拟计算了少模光纤布拉格光栅基模及高阶模的耦合与传输特性,得到在相同外部折射率变化情况下,少模光纤基模与高阶模耦合对应的布拉格波长变化,比正、反向基模之间耦合对应的布拉格波长变化显著增大。实验上制作了少模光纤布拉格光栅,测量了基模之间以及基模与高阶模之间对应的布拉格波长随外部折射率、温度变化的情况,得到与理论分析相符的结果。而对于温度变化对折射率测量结果干扰的问题,提出了通过计算布拉格波长差来克服温度影响的方法。这些结果为采用布拉格光纤光栅测量外部折射率变化提供了一种新的途径。

**关键词** 光纤传感;少模光纤布拉格光栅;外部折射率测量;光纤光栅温度效应补偿

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## Analysis and Measurement on Refractive Index Sensing of Few Mode Fiber Bragg Gratings

Xu Junjiao<sup>1</sup> Li Jie<sup>1</sup> Rong Huabei<sup>1</sup> Shi Zhidong<sup>2</sup> Dong Xiaopeng<sup>1,2</sup> $\left[ \begin{array}{l} ^1 \text{ Institute of Lightwave Technology, School of Information Science and Technology, Xiamen University,} \\ \text{Xiamen, Fujian 361005, China} \\ ^2 \text{ Shanghai Key Laboratory of Specialty Fiber Optics, Shanghai University, Shanghai 201800, China} \end{array} \right]$ 

**Abstract** The coupling and propagation characteristics of fundamental modes and high-order modes in the few mode fiber Bragg grating was numerically analyzed and simulated. It is indicated that the shifts of the Bragg wavelength corresponding to the coupling between the fundamental mode and the backward high-order mode is obviously larger than the shift of the Bragg wavelength corresponding to the coupling between the forward and backward fundamental modes. The few mode fiber Bragg grating was fabricated, and the variations of Bragg wavelengths corresponding to fundamental modes coupling and fundamental-high-order modes coupling with external refractive index and temperature were measured. The experimental results agree with the theoretical analysis. Therefore by the means of Bragg wavelength difference calculation, the temperature induced fluctuation is overcome, which presents a new way to measure the external refractive index change of fiber Bragg gratings.

**Key words** fiber sensing; few mode fiber Bragg grating; external refractive index measurement; temperature compensation of fiber grating

## 1 引言

通过检测光纤光栅模式耦合对应的谐振波长变化,可以将其应用于温度、应变、外部折射率、以及其他多种物理量及参量的传感和测量<sup>[1-5]</sup>。目前用于传感测量的光纤光栅主要有布拉格(Bragg)光纤光

栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPFG)两种<sup>[6]</sup>,对于在测量外部折射率变化方面的应用,由于长周期光纤光栅基于单模光纤基模与包层模之间的耦合,外部折射率变化对光纤包层模传输特性会有较大影响,因此有较大的灵敏度。但由于长周期光纤光栅

收稿日期: 2007-06-14; 收到修改稿日期: 2007-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(60177026)、厦门大学 985 项目和上海市重点学科建设项目(T0102)资助课题。

作者简介: 徐俊娇(1984-),女,江西高安人,硕士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。

E-mail: xujunjiao@163.com

导师简介: 董小鹏(1963-),男,浙江宁波人,教授,博士生导师,主要从事光纤技术及其在光通信与光传感领域的应用方面的研究。E-mail: xpd@xmu.edu.cn,通信作者。

对光纤弯曲和放置状态十分敏感,以及高阶包层模传输特性较不稳定,基于长周期光纤光栅的折射率传感在实际使用时会存在一定困难。常规布拉格光纤光栅对应光纤芯模之间的耦合,因此其传输特性较稳定,弯曲对其布拉格波长的影响也很小。但对于光纤芯模,由于基模场峰值位于纤芯中心,在包层区以指数形式迅速衰减,正、反向基模之间耦合对应的布拉格波长对具有一定厚度包层外的折射率变化敏感性相对较低。因此,虽然普通布拉格光纤光栅比长周期光纤光栅有更稳定的传输特性,利用普通布拉格光纤光栅进行外部折射率变化的测量在实际应用时有较大困难。

为了提高光纤光栅布拉格波长对于外部折射率变化的响应,可以通过化学腐蚀等方法减小光纤的包层厚度<sup>[7,8]</sup>,增加基模场在被测溶液中的强度,或通过检测前向基模与后向包层模耦合对应的布拉格波长变化进行折射率传感方案<sup>[9]</sup>。但这些方案对折射率灵敏度的提高仍然有限。由于光纤高阶模的场相对于基模更多地向包层区延伸,如果在一个可以支持基模以外其它高阶模式传输,但传输模式个数较少(线偏振模表示时模式个数通常低于 10 个)的光纤中,通过测量光纤基模与高阶模之间耦合对应的布拉格波长随外部折射率的变化,可以得到更高的灵敏度。为表述的简洁和方便,本文在下面将这种在工作波长下可以同时传输基模和少数几个高阶模的光纤称为“少模光纤”。同时提出一种新的基于少模光纤布拉格光栅基模与高阶模耦合的外部折射率测量方案,并对这一方案作了理论分析和实验测量。

## 2 少模光纤光栅的传输特性

在上一节引入“少模光纤”定义后,相应地将工作于少模区的光纤光栅称作“少模光纤光栅”。理论上,当光源工作波长小于光纤中高阶模的截止波长时该高阶模即可以在光纤中传输。在标量模近似下,当光源波长减小时,可以在光纤中传输的高阶模依次为  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{02}$ , ... 等。因此,选择参量适当的掩模板在光纤芯区写入布拉格光栅,正向传输的基模  $LP_{01}$  就有可能与反向传输的基模以及满足相位匹配条件的高阶模耦合,相应地在传输谱线上可以观察到对应的谐振峰。若在输入端仅激发正向传输的基模,模式间耦合应满足的相位匹配条件为

$$\begin{aligned} \beta_{01} - \beta_{01} &= 2\pi/\Lambda, \\ \beta_{01} - \beta_{mn} &= 2\pi/\Lambda, \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\Lambda$  为光纤布拉格光栅的周期,  $\beta$  为模式的传输常

数,上标 +、- 分别表示正向及反向传输模,下标  $mn$  为 LP 模式符号。对于圆对称光纤,与  $LP_{01}$  耦合的高阶模应为  $LP_{0n}$  模<sup>[9]</sup>,而  $m = 0$  对应的第一个高阶模为  $LP_{02}$  模。

采用光栅周期为 721.5 nm 的相位掩模板,通过 248 nm 波长 KrF 准分子激光器在常规 G.652 圆形单模光纤中写入光栅,制作了少模光纤布拉格光栅。实验测得的少模光纤光栅传输谱线如图 1 所示。从图 1 可见位于 1048.97 nm 和 1048.03 nm 中心波长处各有一个谐振峰,分别为正、反向  $LP_{01}$  模之间、和正向  $LP_{01}$  模与反向  $LP_{02}$  模之间耦合对应的谐振波长。

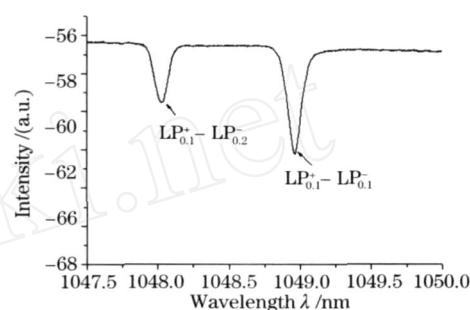


图 1 少模光纤光栅传输谱线图

Fig. 1 Experimental transmission spectrum of the few mode fiber grating

## 3 外界折射率变化对少模布拉格光栅波长影响的模拟分析

为增加光纤光栅对外部折射率变化的敏感性,可以将光纤外包层腐蚀减小厚度,增大光纤传输的芯模与外部折射率的相互作用强度。有限包层厚度的阶跃型光纤折射率沿径向分布模型如图 2 所示,其中  $n_1$ 、 $n_2$  和  $n_3$  分别代表光纤芯区、厚度减小的包层及外部材料(溶液)的折射率,  $a$ 、 $d$  分别代表纤芯

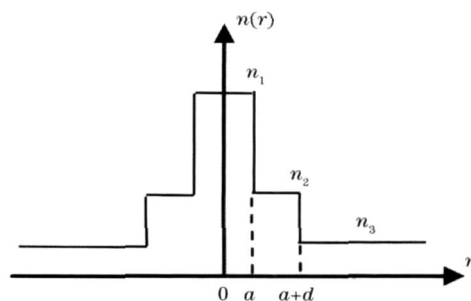


图 2 阶跃型光纤折射率沿径向分布图

Fig. 2 Radial distribution of the index profile of the step-index fiber

半径及光纤内包层厚度。

采用加拿大 Apollo 光子公司基于有限差分算法的 APSS 波导分析和设计软件来模拟和分析圆形光纤外部折射率变化对光纤传输特性的影响。计算所用的光纤参量为： $a = 4.5 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1.458$ ,  $n_2 = 1.450$ , 光栅周期  $\Lambda$  取为  $355.75 \text{ nm}$ 。通过计算可以得到满足 (1) 式相位匹配条件, 正向  $\text{LP}_{01}^+$  与反向  $\text{LP}_{01}^-$ 、以及  $\text{LP}_{01}^+$  与反向  $\text{LP}_{02}^-$  模式之间耦合对应的布拉格波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  随外部折射率和其它光纤参量的变化曲线。

图 3 是模拟计算得到的当外部材料折射率从 1.33 变化至 1.40 时, 布拉格波长  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  随光纤内包层厚度  $d$  的变化情况。从图 3 可见, 当内包层厚度较大时 ( $d > 3.5 \mu\text{m}$ ), 外部折射率变化对  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  的影响很小。当  $d$  减小时,  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  的移动量  $\Delta\lambda_1$  及  $\Delta\lambda_2$  均有较大增加, 可见光纤内包层厚度越小,  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  对外部折射率变化的灵敏度越大。

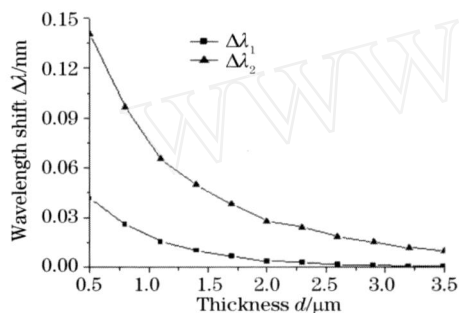


图 3 外界折射率  $n_3$  从 1.33 变化到 1.40 时,  $\lambda_1$  与内包层厚度  $d$  的关系

Fig. 3 Variation of the Bragg wavelength shift with the thickness  $d$  of the inner cladding, while the external refractive index  $n_3$  changes from 1.33 to 1.40

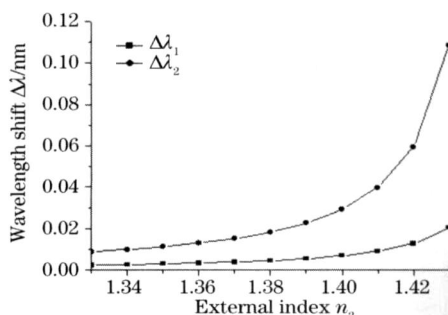


图 4 当内包层厚度  $d = 1.0 \mu\text{m}$  时,  $\lambda_1$  与外界折射率  $n_3$  的关系

Fig. 4 Variation of the Bragg wavelength shift with the external refractive index  $n_3$ , while the thickness of the inner cladding  $d = 1.0 \mu\text{m}$

图 4 给出了内包层厚度  $d = 1.0 \mu\text{m}$  时  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  随外部折射率的变化曲线。从该图可见  $\text{LP}_{01}^+$  与  $\text{LP}_{02}^-$  模耦合对应的谐振波长变化明显大于正、反向基模间耦合对应的波长变化。当  $n_3$  接近光纤内包层折射率时,  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  随折射率的变化率明显增加, 这是由于光纤等效折射率差减小,  $V$  值 (归一化频率) 下降, 场更快地向包层扩散的缘故。

可以定义布拉格波长随外界折射率变化的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n_3} \quad (2)$$

为与文献[7]和[9]的结果对比, 图 5 给出了当光纤光栅的包层被完全腐蚀, 纤芯半径仅为  $3 \mu\text{m}$  时, 灵敏度随外部折射率  $n_3$  变化的模拟计算曲线。从图 5 可以看出,  $n_3$  变大时灵敏度显著增加, 当  $n_3 = 1.43$  时  $\text{LP}_{01}$  与  $\text{LP}_{02}$  模耦合对应的灵敏度可达  $207 \text{ nm}$ , 明显高于文献[7]中基于基模之间耦合得到的灵敏度  $71.2 \text{ nm}$ , 以及文献[9]中基于基模与包层模耦合得到的灵敏度  $172 \text{ nm}$  的结果。

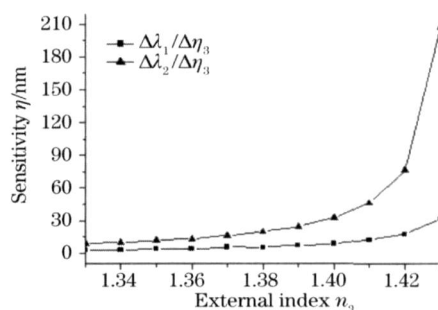


图 5 包层完全腐蚀, 纤芯半径  $a = 3 \mu\text{m}$  时, 灵敏度随外界折射率  $n_3$  变化的曲线

Fig. 5 Sensitivity of the Bragg wavelength shift versus the external refractive index  $n_3$ , as the fiber cladding is totally etched with the core diameter  $a = 3 \mu\text{m}$

## 4 实验测量与结果

实验采用的测量方案如图 6 所示。其中系统光源是由  $980 \text{ nm}$  波长半导体激光器抽运掺 Yb 光纤

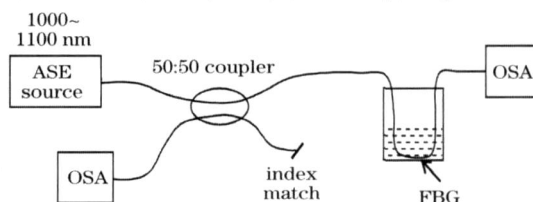


图 6 实验系统框图

Fig. 6 Diagram of experimental arrangement

制成的放大自发辐射(ASE)宽带光源,其波长范围为 1000~1100 nm。光源输出经 50/50 耦合器分光后与少模光纤光栅连接,光栅传输或反射的光谱由 ANDO 公司的 AQ6317B 测量。为提高少模光纤光栅的灵敏度,实验前先将光栅在 40% 的 HF 溶液中浸泡 35 min,腐蚀后光纤包层厚度估计为 0.5  $\mu\text{m}$ 。测量时将腐蚀后的少模光纤光栅平直地放置在未加溶液的容器底部,然后在容器中分别加入在实验室预先配置和通过阿贝折射仪测量好、具有不同折射率的水和甘油混合溶液,并通过光谱仪(OSA)分别测量液体折射率从 1.33 变化到 1.426 时,  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  的变化情况,结果如图 7 所示。

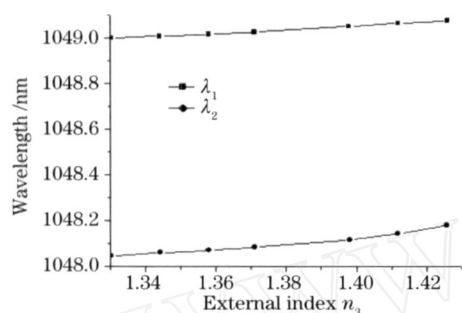


图 7 少模光纤光栅布拉格波长随外界折射率的变化

Fig. 7 Variation of the Bragg wavelengths with the change of the refractive index  $n_3$  of external liquid

从图 7 测量结果可以看出,当外部折射率  $n_3$  变化时,  $\text{LP}_{02}$  模对应的布拉格波长变化明显高于基模之间耦合对应的波长变化。例如,当  $n_3$  从 1.412 变化至 1.426 时,  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  对应的波长变化量分别为 0.012 nm 及 0.037 nm,  $\lambda_2$  的变化量是  $\lambda_1$  的 3.08 倍,  $\lambda_2$  在此折射率变化下对应的灵敏度为 2.643 nm。

如何消除温度对测量结果的影响是实际测量中必须考虑和解决的一个问题。实验上对纯水溶液 ( $n_3 = 1.33$ ) 下光纤布拉格波长  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  随溶液温度的

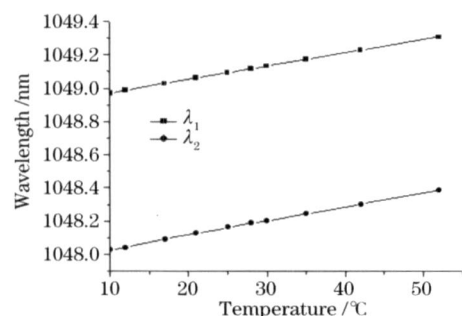


图 8 少模光纤光栅布拉格波长随温度的变化

Fig. 8 Variation of the Bragg wavelengths with the temperature

变化情况进行了测量,结果如图 8 所示。当液体温度从 10 变化至 52 时,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  波长线性增加,斜率分别为 8.0 pm/°C 和 8.3 pm/°C。因此基模之间、以及基模与高阶模之间耦合对应的布拉格波长随温度变化量基本相同。因此,可以看出如果在实验上同时测量这两个布拉格波长,并计算他们的差值,就可以得到与被测液体温度无关的数据和结果。

## 5 结 论

通过对圆形少模光纤基模之间及基模与  $\text{LP}_{02}$  高阶模之间耦合对应的布拉格波长随外界折射率变化的理论分析和实验测量,可以得出采用检测基模与高阶模之间耦合对应的布拉格波长变化的方法,大大提高传感器对外部折射率变化的灵敏度。同时,由于圆形少模光纤光栅基模及高阶模耦合对应的布拉格波长对温度有近似相同的特性,可以通过测量并计算这两个布拉格波长移动量的差值消除温度对测量结果的影响。通过合理设计少模光纤及光栅的参量,优化其传感测量性能,这种新型的传感测量方法在实际中将有较大的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Y. J. Rao. In-fibre Bragg grating sensors [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**: 355~375
- 2 V. Bhatia, A. M. Vengsarkkar. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694
- 3 H. J. Patrick, G. M. William, A. D. Kersey *et al.*. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination [J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9): 1223~1225
- 4 Sun An, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Temperature and pressure responsive characteristics of polymer packaged fiber Bragg grating with large dynamic range [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 224~227
- 孙安,乔学光,贾振安等. 聚合物封装光纤布拉格光栅传感器温度压力特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 224~227
- 5 Xingfa Dong, Yonglin Huang, Li Jiang *et al.*. Active temperature compensation design of sensor with fiber gratings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10): 562~564
- 6 Turan Erdogan. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- 7 Wei Liang, Yanyi Huang, Yong Xu *et al.*. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(15): 151122-1~3
- 8 A. Iadicco, A. Cusano, A. Cutolo *et al.*. Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1149~1151
- 9 Yun Binfeng, Chen Na, Cui Yiping. Reflective index sensing characteristics of fiber Bragg grating based on cladding mode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **26**(7): 1013~1015
- 恽斌峰,陈娜,崔一平. 基于包层模的光纤布拉格光栅折射率传感特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1013~1015